

Wysokoczęstotliwościowe drajwery tranzystorów MOSFET mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę właściwości, badania eksperymentalne i realizację wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych o częstotliwości pracy sięgającej 30 MHz. Przebadano dwa scalone, wysokoczęstotliwościowe drajwery dostępne na rynku o oznaczeniu DEIC420 i DEIC515 oraz zaprojektowano dwa dyskretne układy własnej konstrukcji. Badania eksperymentalne przeprowadzono pod kątem analizy strat mocy oraz czasów przełączeń poszczególnych układów.

Abstract. This paper presents a systematic approach to design high performance gate drive circuits for high speed switching applications. In the project tested two integrated drivers DEIC420, DEIC515, and additionally two discrete drivers 4xZXGD3003 and 8xEL7457 have been designed. The new MOSFET Drivers have been verified by using the universal laboratory in Department of Power Electronics, Electrical Drives and Robotics Silesian University of Technology. (**High-Frequency Power MOSFET Drivers**).

Słowa kluczowe: drajwer, analiza, straty mocy, tranzystor MOSFET.

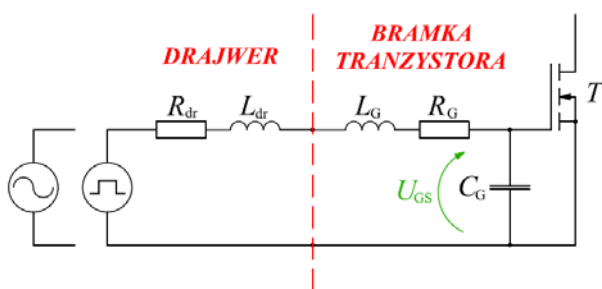
Keywords: driver, analysis, power losses, MOSFET Transistor.

doi:10.12915/pe.2014.05.51

Wprowadzenie

Podczas budowy wysokoczęstotliwościowych falowników rezonansowych niezwykle ważne jest zagadnienie przełączania bramki tranzystorów MOSFET mocy. Doysterowania bramki pojedynczego tranzystora można posłużyć się dedykowanym układem nazywanym często drajwerem (ang. driver) – sterownikiem. Głównym zadaniem drajwera jest zapewnienie odpowiednich poziomów napięć dla załączania i wyłączania tranzystora oraz efektywne przeładowywanie pojemności bramki w możliwie najkrótszym czasie.

Przeważająca większość drajwerów dostępnych na rynku i dedykowanych do zastosowań wysokoczęstotliwościowych nie radzi sobie z efektywnym przeładowywaniem wewnętrznej wejściowej pojemności C_G bramki tranzystora, co w efekcie skutkuje znacznym wzrostem czasów przełączeń oraz wzrostem mocy czynnej pobieranej ze źródła zasilania. Straty mocy sięgają nawet kilkudziesięciu watów, a czasy przełączeń kilkunastu nanosekund.



Rys.1. Schemat zastępczy obwodu bramkowego drajwer-tranzystor

Na rynku dostępnych jest bardzo wiele różnych, ciekawych rozwiązań drajwerów dedykowanych do zastosowań wysokoczęstotliwościowych. Dostępne scalone układy mogą pracować przy częstotliwości sięgającej kilkudziesięciu megaherców, ale posiadają bardzo wiele istotnych wad, np. bardzo duży pobór mocy czynnej ze źródła zasilania oraz stosunkowo dużą indukcyjność doprowadzeń L_G . Duży pobór mocy czynnej przez wysokoczęstotliwościowe drajwery spowodowany jest wartością ładunku bramki który muszą one przeładowywać, wynoszącą typowo 20 – 100 nC oraz czasami przełączeń wynoszącymi typowo 4 – 10 ns. Aby efektywnie przeładowywać tak duże ładunki bramek tranzystorów z częstotliwościami pracy wynoszącymi kilkadziesiąt megaherców konieczna jest minimalizacja indukcyjności

doprowadzeń (L_{dr} - L_G) pomiędzy drajwerem a bramką tranzystora, ograniczającą prąd przeładowujący bramkę.

Ze względu na wymienione wcześniej wady postanowiono w ramach projektu opracować własną dyskretną konstrukcję drajwera, który byłby w stanie możliwie efektywnie i niezawodnie przełączać bramkę tranzystora MOSFET. Nowa konstrukcja powinna charakteryzować się krótkimi czasami przełączeń, na poziomie kilku nanosekund i stratami mocy, co najmniej 2-krotnie mniejszymi niż drajwery dostępne obecnie na rynku.

Opis projektu

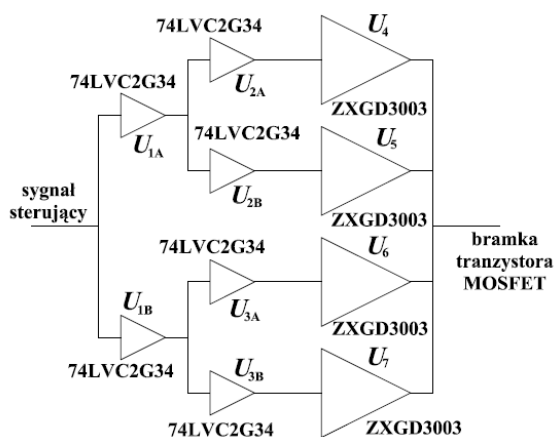
Podczas badań prowadzonych w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej zaprojektowano i wykonano dwa dyskretne drajwery oraz porównano je z dwoma znanymi scalonymi układami drajwerów dostępnymi na rynku. Wszystkie układy scalone, które posłużyły do wykonania prototypów nowych drajwerów zostały wyselekcjonowane na podstawie starannego przeglądu dostępnych na rynku układów, stosowanych do sterowania tranzystorów MOSFET mniejszej mocy. Każde z zaproponowanego rozwiązania drajwera zostało wykonane w postaci obwodu drukowanego na specjalnej płytce drukowanej o podłożu z aluminium. W celu umożliwienia efektywnego odprowadzenia ciepła wydzielanego przez poszczególne układy, każdy z drajwerów został przykręcony bezpośrednio do radiatora. Płytkę drukowaną o grubości 1,5 mm składa się z warstwy aluminium na które nałożono cienką warstwę izolatora ceramicznego i miedzi o łącznej grubości 17 μ m.

Głównym zadaniem opracowanych drajwerów było przeładowywanie z częstotliwością 30 MHz bramki tranzystora mocy MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A firmy IXYS (napięcie dren źródło 500 V, prąd drenu 16 A, obudowa DE275, ładunek bramki 50 nC). W dalszej części artykułu pokrótce scharakteryzowano poszczególne rozwiązania zaproponowanych układów drajwerów.

Drajwer 4xZXGD3003

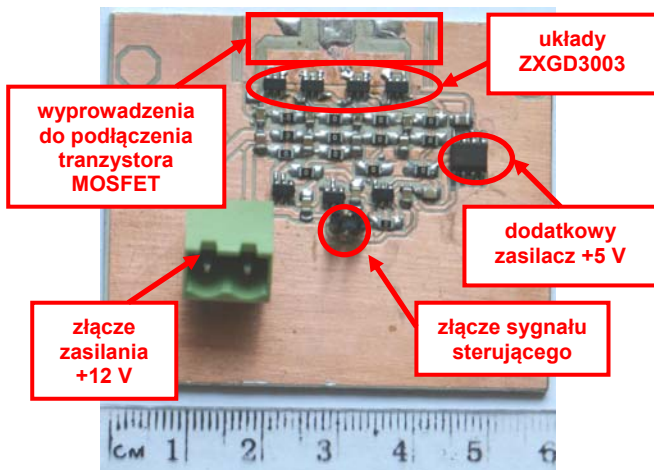
Pierwszy z opracowanych dyskretnych drajwerów został wykonany na bazie układu o oznaczeniu ZXGD3003 charakteryzującego się maksymalnym prądem wyjściowym na poziomie 5 A. Układ ten jest produkowany w obudowie SOT-23 o wymiarach 2,7×2,2 mm, która nie zapewnia efektywnego odprowadzania ciepła. Na potrzeby wykonania specjalizowanego drajwera postanowiono połączyć (poprzez bufory wzmacniające 74LVC2G34) równolegle cztery tego typu układy. Takie połączenie pozwoliło

zmniejszyć obciążalność prądową pojedynczego układu, jak również uzyskać mniejsze straty mocy w pojedynczym drajwerze. Schemat ideowy drajwera 4xZXGD3003 przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Schemat ideowy drajwera 4xZXGD3003

Rzeczywisty wygląd zaprojektowanego drajwera przedstawiono na rysunku 3. Zaznaczono na nim elementy składowe nowego drajwera takie jak: złącze zasilania, dodatkowy zasilacz, bufony wzmacniające oraz wyprowadzenia służące do podłączenia tranzystora MOSFET mocy.



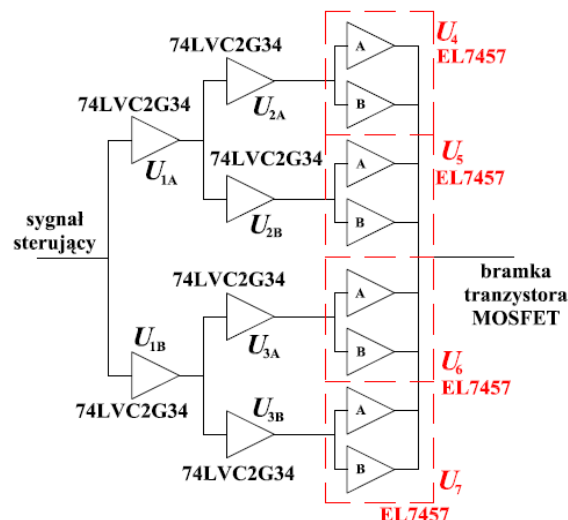
Rys.3. Rzeczywisty wygląd drajwera 4xZXGD3003

Drajwer 8xEL7457

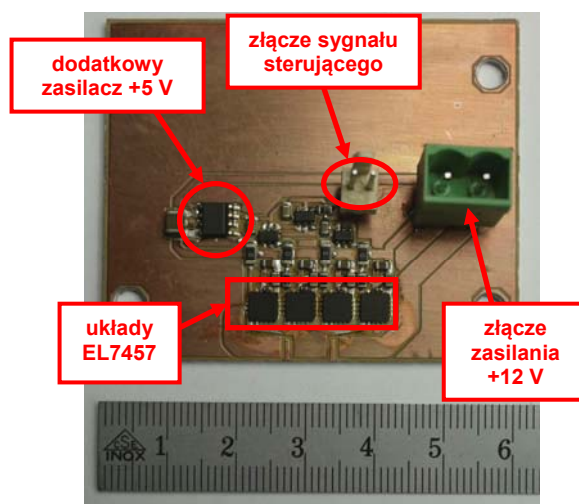
Drugim zaprojektowanym układem był drajwer o oznaczeniu 8xEL7457. Drajwer ten wykonano łącząc równolegle cztery scalone układy EL7457. Drajwery te są wykonywane po cztery sztuki w jednej obudowie QFN o wymiarach 4x4 mm. Ze względu na dużą wartość strat mocy wydzielanych w poszczególnych układach i ograniczone możliwości odprowadzania ciepła z bardzo małej obudowy zdecydowano się na wykorzystanie tylko dwóch drajwerów z każdej obudowy. Podsumowując, drajwer wykonano z czterech układów scalonych EL7457 po dwa drajwery na układ scalony. Schemat ideowy drajwera przedstawiono na rysunku 4. Składa się on z ośmiu drajwerów EL7457 (U4, U5, U6, U7) oraz dodatkowych wzmacniaczy sygnału sterującego (U1, U2, U3). Stosowanie dodatkowych wzmacniaczy jest konieczne ze względu na dopuszczalną obciążalność generatora przebiegu sterującego.

Fotografię opracowanego drajwera przedstawiono na rysunku 5. Zaznaczono na niej: układy scalone drajwera,

pady do podłączenia tranzystora w obudowie IXYS DE-275, złącze zasilania oraz złącze sygnału sterującego.



Rys.4. Schemat ideowy drajwera 8xEL7457



Rys.5. Rzeczywisty wygląd zaprojektowanego drajwera 8xEL7457

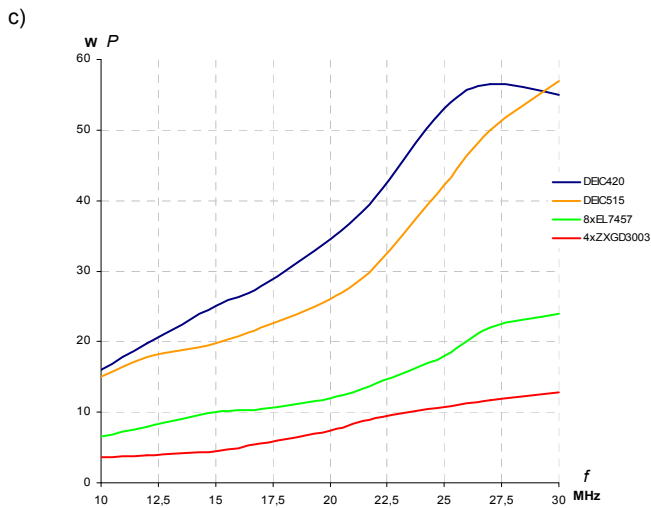
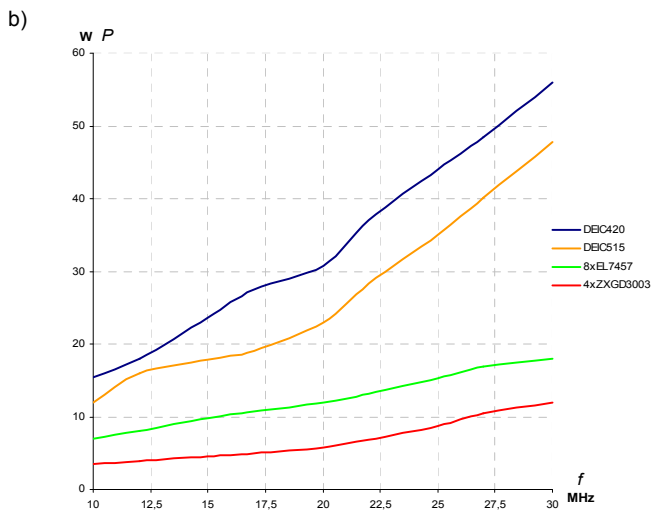
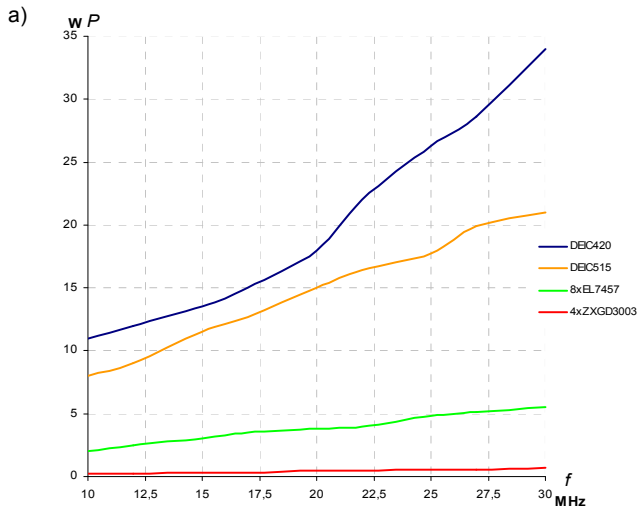
Wyniki badań

W ramach projektu przebadano laboratoryjnie i porównano następujące wysokoczęstotliwościowe drajwery tranzystorów MOSFET mocy:

- zakupione scalone: DEIC420 i DEIC515;
- skonstruowane dyskretnie: 8xEL7457 i 4xZXGD3003.

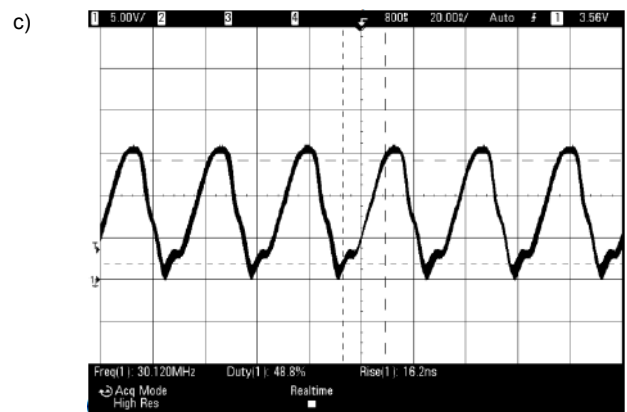
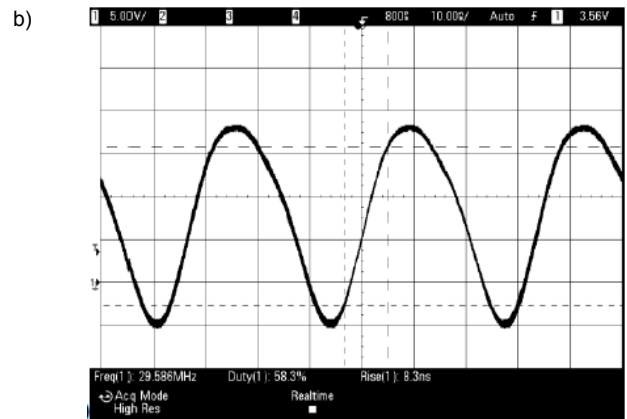
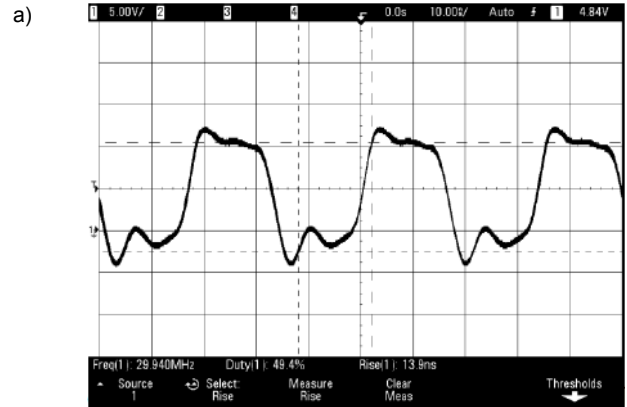
Pomiarów dokonywano dla napięcia zasilania drajwerów $U_{ZAS} = 12 \text{ V}$, częstotliwość pracy była zadawana z zewnętrznego układu sterowania, wg przedziału od 10 do 30 MHz (co 2,5 MHz). Na tej podstawie wykreślono charakterystyki mocy czynnej (rys.6) pobieranej przez drajwery dla trzech stanów pracy: biegu jałowego, obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem o wartości 3 nF, obciążenia bramką tranzystora MOSFET mocy o oznaczeniu DE275-501N16A. Dodatkowo, dla każdego drajwera zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia wyjściowego w trzech stanach pracy (rys.7 ÷ rys.10).

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 6 można odczytać wartość mocy czynnej pobieranej przez scalone drajwery tranzystorów MOSFET dla częstotliwości pracy 30 MHz. Dla biegu jałowego drajwer scalony DEIC420 pobiera około 34 W, a drajwer DEIC515 pobiera 21 W. W przypadku obciążenia tych scalonych drajwerów bramką tranzystora o oznaczeniu DE275-501N16A pobierają one moc czynną wynoszącą około 50 W.



Rys.6. Charakterystyki mocy pobieranej przez drajwery: a) dla biegu jałowego, b) przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET mocy

Opracowane w ramach projektu dyskretne drajwery charakteryzują się ponad 6-krotnie mniejszym poborem mocy dla biegu jałowego. Wyjątek tutaj stanowi układ 4xZXGD3003, który charakteryzuje się 30-krotnie mniejszym poborem mocy dla biegu jałowego w stosunku do drajwerów scalonych dostępnych na rynku i 5-krotnie mniejszym poborem mocy w stosunku do dyskretnego drajwera 8xEL7457.



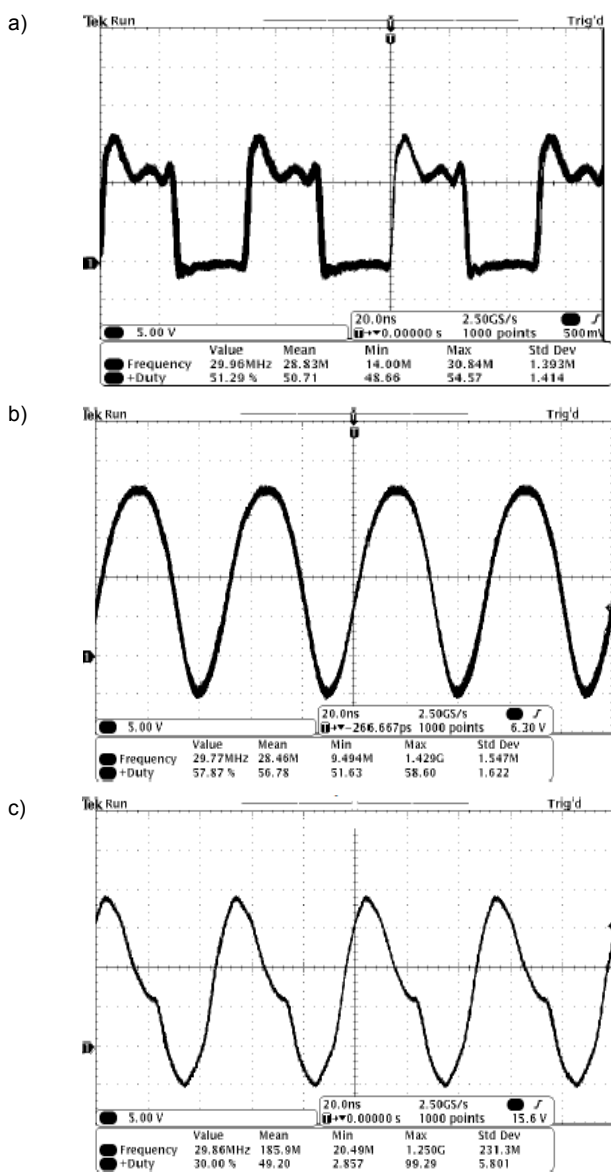
Rys.7. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera DEIC420 (5 V/div; 30MHz): a) dla biegu jałowego, b) przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET mocy, d) zdjęcie z kamery termowizyjnej

Zaproponowane dyskretne rozwiązania wyróżniają się również 3-krotnie mniejszym poborem mocy dla obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem o wartości 3 nF. Różnica w mocy pobieranej przez drajwery przy obciążeniu

kondensatorem 3 nF a bramką tranzystora MOSFET wynika z rzeczywistych parametrów obwodu bramkowego samego tranzystora, takich jak np. indukcyjności doprowadzeń, rezystancja bramki tranzystora.

W dalszej części artykułu zamieszczono oscylogramy (rys.7 ÷ rys.10) napięcia wyjściowego każdego przebadanego drajwera dla trzech stanów pracy: biegu jałowego, obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF i obciążenia bramką tranzystora MOSFET mocy przy częstotliwości 30 MHz. Dodatkowo zamieszczono również zdjęcia z kamery termowizyjnej ilustrujące rozkład temperatury na obudowie drajwera scalonego DEIC420 oraz płytkach PCB dyskretnych drajwerów zaprojektowanych w ramach projektu badawczego.

Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera DEIC420 przedstawiono na rysunku 7. Po obciążeniu go kondensatorem 3 nF (rys.7b), jego napięcie wyjściowe jest quasi-sinusoidalne co świadczy o tym, że jego częstotliwość przełączeń jest zbliżona do częstotliwości rezonansowej obwodu utworzonego przez obwód wyjściowy drajwera oraz dołączony kondensator 3 nF.

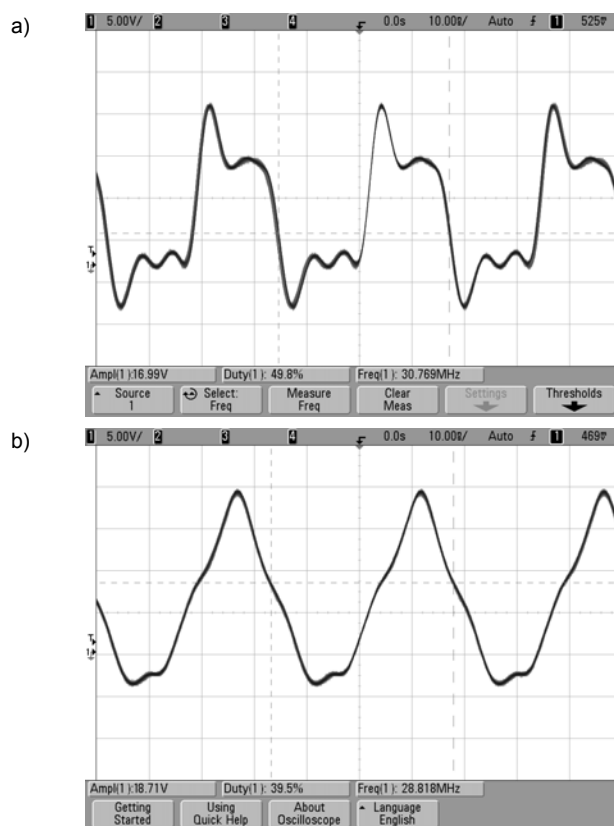


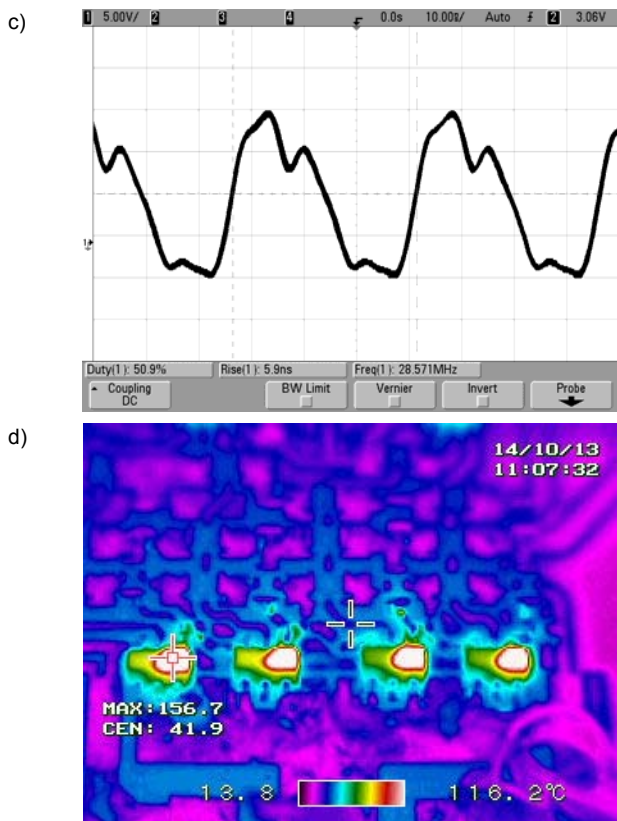
Rys.8. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera DEIC515 (5 V/div; 30MHz): a) dla biegu jałowego, b) przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET mocy

Napięcie wyjściowe drajwera w przypadku obciążenia go bramką tranzystora MOSFET mocy (rys.7c) różni się od przypadku obciążenia go bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF. Fakt ten, jest spowodowany wprowadzeniem do obwodu wyjściowego drajwera dodatkowej indukcyjności bramki tranzystora DE275-501N16A, która wynosi około 5 nH. Należy podkreślić, że mierzone napięcie przedstawione na rysunku 7c, nie jest napięciem występującym na wewnętrznej pojemności bramki tranzystora MOSFET, jest ono pomniejszone o spadki napięć na indukcyjności doprowadzeń i rezystancji bramki tranzystora.

Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera DEIC515 przedstawiono na rysunku 8. Zostały one zarejestrowane dla takich samych warunków pracy jak w poprzednim przypadku. Drajwer ten charakteryzuje się mniejszym poborem mocy oraz większą stromością narastania i opadania zboczy dla biegu jałowego oraz zbliżonym napięciem przy obciążeniu. Czasy narastania i opadania sygnału wyjściowego były mierzone w przedziale od 10 do 90 % wartości maksymalnej napięcia dla biegu jałowego (rys.7a i rys.8a). Czasy narastania i opadania napięcia wyjściowego wyniosły odpowiednio: dla drajwera DEIC420 – 2,9 ns i 3,1 ns, dla drajwera DEIC515 – 2,2 ns i 2,9 ns.

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi napięcia wyjściowego dyskretnego drajwera o oznaczeniu 4xZXGD3003. Zaprojektowany drajwer 4xZXGD3003, którego konstrukcja została opisana wcześniej charakteryzuje się bardzo małym poborem mocy przy biegu jałowym, wynoszącym 0,6 W. W przypadkach obciążenia wyjścia drajwera kondensatorem 3 nF lub bramką tranzystora, drajwer nie pobiera większej mocy niż 12 W (przy częstotliwości 30 MHz). Wartość mocy czynnej pobieranej ze źródła zasilania jest więc 5-krotnie niższa, niż w przypadku drajwerów scalonych dostępnych na rynku.





Rys.9. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera 4xZXGD3003 (5 V/div; 30MHz): a) dla biegu jałowego, b) przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET mocy, d) zdjęcie z kamery termowizyjnej

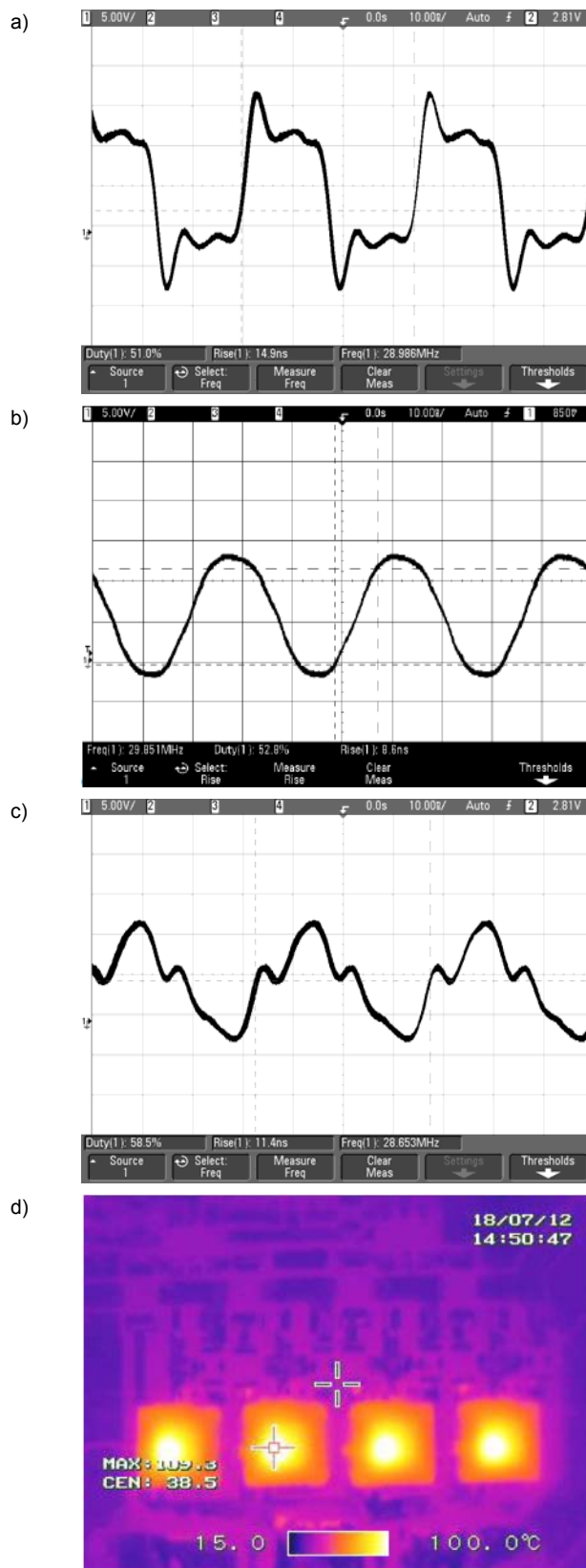
Dodatkowo zaprojektowany układ charakteryzuje się czasem narastania na poziomie 2,1 ns oraz czasem opadania na poziomie 2,5 ns (dla biegu jałowego w przedziale od 10 do 90 % wartości maksymalnej sygnału wyjściowego przy częstotliwości 30 MHz).

Na rysunku 9d przedstawiono przykładowe zdjęcie z kamery termowizyjnej pokazujące rozptył ciepła wydzielanego przez układy ZXGD3003 podczas pracy z częstotliwością 30 MHz przy obciążeniu wyjścia drajwera bramką tranzystora DE275-501N16A. Na podstawie obserwacji zamieszczonego zdjęcia (rys.9d) można stwierdzić, że temperatura pracy układów ZXGD3003 jest nieznacznie wyższa (o 6,7°C) niż zalecana przez producenta. Aby uniknąć zniszczenia układów scalonych w czasie długotrwałej pracy drajwera i poprawić jakość chłodzenia układów postanowiono umieścić na obudowach SOT-23 radiator wytłaczany o wymiarach 19×6 mm.

Kolejnym przebadanym układem był dyskretny drajwer o oznaczeniu 8xEL7457 którego przebiegi czasowe napięcia wyjściowego przedstawiono na rysunku 10. Drajwer ten charakteryzuje się poborem mocy (przy częstotliwości 30 MHz) na poziomie 5,5 W – dla biegu jałowego i 24 W dla pracy pod obciążeniem bramką tranzystora MOSFET mocy. W praktyce zastosowanie scalonego drajwera 8xEL7457 umożliwia zmniejszenie mocy niezbędnej do sterowania tranzystorem MOSFET o około 35 W. Czasy przełączeń drajwera dla częstotliwości pracy 30 MHz przy biegu jałowym wyniosły: 2,2 ns – dla zbocza narastającego i 2,6 ns – dla zbocza opadającego.

Prowadząc badania drajwera o oznaczeniu 8xEL7457, przeprowadzono również analizę jego właściwości cieplnych za pomocą rejestracji termowizyjnej. Przykładowe zdjęcie termowizyjne drajwera, po podłączeniu do jego wyjścia bramki tranzystora DE275-501N16A (częstotliwość 30 MHz, napięcie zasilania 12 V), zamieszczono na

rysunku 10d. Na podstawie obserwacji zamieszczonego zdjęcia można stwierdzić, że obudowy układów scalonych drajwera (EL7457) nie przekraczają dopuszczalnej temperatury pracy zalecanej przez producenta, wynoszącej 125°C.



Rys.10. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera 8xEL7457 (5 V/div; 30MHz): a) dla biegu jałowego, b) przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET mocy, d) zdjęcie z kamery termowizyjnej

Należy jednocześnie podkreślić, że z każdego układu scalonego EL7457 o wymiarach 4×4 mm odprowadzana jest moc czynna około 6 W. Jest to wyłącznie możliwe dzięki zastosowaniu specjalnej płytki drukowanej z podłożem aluminiowym, którą zamocowano na radiatorze.

W tabeli 1 zestawiono wyniki badań laboratoryjnych wszystkich drajwerów dla poszczególnych rodzajów pracy.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań czterech typów drajwerów

	DEIC420	DEIC515	4xZXGD3003	8xEL7457
U_{ZAS}	12 V	12 V	12 V	12 V
f_{MAX}	45 MHz	45 MHz	30 MHz	40 MHz
I_{OMAX}	20 A	15 A	5 A	2 A
R_O	0,4 Ω	0,5 Ω	1 Ω	4,5 Ω
C_O	4 nF	3 nF	1 nF	3 nF
$P_{30MHz/BJ}$	34 W	21 W	0,7 W	5,5 W
$P_{30MHz/3nF}$	56 W	47,8 W	11,8 W	18 W
$P_{30MHz/BT}$	55 W	57 W	12,8 W	24 W
$t_{d(rise)}$	2,95 ns	2,2 ns	2,1 ns	2,2 ns
$t_{d(fall)}$	3,05 ns	2,9 ns	2,5 ns	2,6 ns
Cena/szt.	150 zł	215 zł	2,50 zł	26 zł

gdzie: U_{ZAS} – napięcie zasilania drajwera; f_{MAX} – maksymalna częstotliwość pracy pojedynczego układu; R_O – rezystancja wyjściowa pojedynczego układu; C_O – pojemność wyjściowa pojedynczego układu; $P_{30MHz/BJ}$ – moc pobierana ze źródła zasilania przy częstotliwości 30 MHz dla biegu jałowego; $P_{30MHz/3nF}$ – moc pobierana ze źródła zasilania przy częstotliwości 30 MHz dla obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF; $P_{30MHz/BT}$ – moc pobierana ze źródła zasilania przy częstotliwości 30 MHz dla obciążenia bramką tranzystora MOSFET mocy; $t_{d(rise)}$ – czas narastania zbocza sygnału wyjściowego drajwera dla biegu jałowego; $t_{d(fall)}$ – czas opadania zbocza sygnału wyjściowego drajwera dla biegu jałowego.

Podsumowanie

W czasie badań laboratoryjnych dotyczących wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy przebadano cztery układy: dwa scalone drajwery o oznaczeniach DEIC420 i DEIC515 oraz dwa dyskretne układy własnej konstrukcji o oznaczeniach 4xZXGD3003 i 8xEL7457.

Porównanie właściwości poszczególnych układów wykazało, że zaproponowane konstrukcje dyskretnych drajwerów dedykowanych do zastosowań wysokoczęstotliwościowych posiadają lepsze parametry niż zakupione drajwery scalone. Dyskretne drajwery 4xZXGD3003 i 8xEL7457 charakteryzują się wielokrotnie mniejszym poborem mocy, przy podobnych przebiegach napięcia wyjściowego. Drajwer 4xZXGD3003 pobiera około 30-krotnie mniejszą moc, niż drajwer scalony DEIC420 (dla biegu jałowego), oraz około 5-krotnie mniejszą moc dla obciążenia bramką tranzystora MOSFET mocy o oznaczeniu DE275-501N16A. Ten dyskretny drajwer charakteryzuje się również dość ostrym zboczem sygnału wyjściowego. Dla biegu jałowego czasy narastania i opadania zbocza napięcia wyjściowego wyniosły odpowiednio 2,1 ns i 2,5 ns. Drajwer 8xEL7457 pobiera o około 30 W mniejszą moc, niż drajwer scalony DEIC420 i o około 15 W w stosunku do drajwera DEIC515 (dla biegu jałowego). Dodatkowo porównując dwa opracowane dyskretne drajwery można zauważyć, że drajwer 8xEL7457 pobiera większą moc o około 5 W w stosunku do drajwera 4xZXGD3003 - dla biegu jałowego i o około 13 W – dla obciążenia bramką tranzystora mocy. Dyskretny drajwer 8xEL7457 charakteryzuje się również nieznacznie gorszymi czasami narastania i opadania zbocza sygnału wyjściowego

w stosunku do drugiego opracowanego układu. Czasy narastania i opadania zbocza sygnału wyjściowego dla drajwera 8xEL7457 wyniosły odpowiednio 2,2 ns i 2,6 ns.

Podsumowując, możliwe jest opracowanie układu wysokoczęstotliwościowego drajwera dedykowanego do tranzystorów MOSFET mocy przy użyciu dostępnych układów scalonych mniejszej mocy. Koszty opracowania i skonstruowania dyskretnych drajwerów są o około 3-razy niższe, niż koszty zakupu drajwerów scalonych.

Badania zostały sfinansowane w ramach projektu BKM-521(RE5)2013 oraz środków własnych Katedry Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach

LITERATURA

- [1] Barkhordarian V., Power MOSFET Basic, International Rectifier, Dokumentacja techniczna
- [2] Balogh L., Design and Application Guide For High Speed MOSFET Gate Driver Circuit, International Rectifier, Dokumentacja techniczna
- [3] Ridley R., Gate Drive Design Tips, Power Systems Design Europe, December 2006, pp. 14-18
- [4] Zhang Z., Eberle W., Liu Y., A 1-MHz High-Efficiency 12 V Buck Voltage Regulator with a New Current-Source Gate Driver, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 23, No. 6, November 2008, pp. 2817-2827
- [5] Scoggins P., A Guide to Designing Gate-Drive Transformers, Power Electronics Technology, January 2007, pp.32-36
- [6] Crebier J., Rouger N., Loss Free Gate Driver Unipolar Power Supply for High Side Power Transistors, IEEE Transactions of Power Electronics, Vol. 23, No. 3, May 2008, pp. 1565-1573
- [7] Bliss J., The MOSFET Turn-Off Device – A New Circuit Building Block, Motorola Semiconductors, Engineering Bulletin, EB142, 1990
- [8] Kaczmarczyk Z., Jurczak W., Falownik klasy E o zmniejszonych stratach mocy tranzystorów – symulacja i badania laboratoryjne, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka 2007, r. 53 z. 4 (204), str. 37-46
- [9] Kaczmarczyk Z., Poprawa właściwości energetycznych falowników klasy E przez maksymalizację wykorzystania tranzystora, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007
- [10] Kasprzak M., Falownik klasy DE 8 MHz/300 W z rezonansowym sterownikiem klasy D o sinusoidalnym kształcie napięcia bramkowego, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr. 2a, str. 28-33
- [11] Kasprzak M., Falownik klasy DE 13,56 MHz/500 W z drajwerem typu flyback, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr. 2, str. 243-246
- [12] Leitermann O., Radio Frequency dc-dc Converters: Device Characterization, Topology Evaluation, and Design, Massachusetts Institute of Technology, February 2008
- [13] Spiazzi G., Mattavelli P., Rossetto L., Design Considerations and Comparison between Two High-Frequency Resonant Drivers for Synchronous Rectification MOSFETs, Applied Power Electronics Conference, APEC 2007, pp. 1644-1650
- [14] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC420 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic420.pdf>
- [15] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC515 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic515.pdf>
- [16] Dokumentacja techniczna układu scalonego ZXGD3003 dostępna pod adresem: <http://www.diodes.com/datasheets/ZXGD3003E6.pdf>
- [17] Dokumentacja techniczna układu scalonego EL7457 dostępna pod adresem: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/fn72/fn7288.pdf>

Autorzy: mgr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Piotr.Legutko@polsl.pl